

Rapporti tecnici INGV

Telerilevamento speditivo mediante
laser scanning e moderne tecniche di
fotogrammetria digitale

319



Direttore Responsabile

Stefano Gresta

Editorial Board

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)



Rapporti tecnici INGV

TELERILEVAMENTO SPEDITIVO MEDIANTE LASER SCANNING E MODERNE TECNICHE DI FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

Arianna Pesci¹, Giordano Teza², Andrea Ninfo², Carmenio Ferrulli³, Elena Bonali⁴

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

²UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (Geoscienze)

³UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI (CdS in Scienza per la Diagnostica e Conservazione dei Beni Culturali)

⁴UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA (CdS in Ingegneria Edile/Architettura)

319

Indice

Introduzione	7
1. Tecniche utilizzate	8
1.1 Laser scanner terrestre	8
1.2 Fotogrammetria SfM	8
2. Caso di studio e rilievi	9
3. Risultati	15
4. Note e Conclusioni	17
Ringraziamenti	21
Bibliografia	21

Introduzione

Recenti sviluppi delle tecniche di telerilevamento hanno dato luogo da un lato alla realizzazione di strumenti laser a scansione concepiti per misure a breve, media e lunga distanza con chiare peculiarità osservazionali, affidabilità e comodità di utilizzo, dall'altro a tecniche fotogrammetriche innovative caratterizzate da una grande precisione e da un elevato livello di automazione del processo di generazione del modello geometrico tridimensionale (3D).

L'applicazione della tecnica laser scanning terrestre (TLS) all'analisi dello stato deformativo di edifici danneggiati da un terremoto o di versanti franosi è stata già trattata più volte nella collana dei rapporti tecnici dell'INGV [Pesci et al., 2011b; Pesci et al., 2013; Pesci et al., 2015]. I sistemi TLS si basano essenzialmente sulla possibilità di inviare impulsi laser (oppure, nel caso degli strumenti a onda continua, segnali laser modulati) e misurarne il tempo di volo (rispettivamente la differenza di fase) in modo da ottenere la distanza tra l'oggetto osservato e lo strumento. In tal modo, la scansione di un'intera superficie fisica di interesse, attuata secondo una griglia angolare calibrata, permette di ottenere modelli tridimensionali ad alta precisione e risoluzione, perciò fedeli alla realtà. Le informazioni tecniche fornite dalle case costruttrici sono generalmente chiare ed esaurienti; tuttavia, è sempre necessario realizzare esperimenti specifici al fine di caratterizzare completamente le prestazioni degli strumenti utilizzati e quindi di ottimizzare il rilievo per una massima resa in termini di risoluzione, stabilità e ripetibilità dei risultati [Pesci et al., 2011a]. Ciò è importante soprattutto in condizioni di emergenza, in cui tempi e logistica di lavoro possono essere non favorevoli; in particolare, se vincoli di sicurezza o di presenza di macerie impongono l'esecuzione del rilievo da posizioni non favorevoli, la conoscenza delle corrispondenti distorsioni introdotte nella modellazione geometrica diviene prioritaria al fine di prevenire ingenui errori di valutazione ed interpretazione dei risultati. Al giorno d'oggi, gli strumenti TLS sono generalmente portabili, veloci, altamente automatizzati e consentono di riprodurre la realtà in tempi rapidi e con costi ragionevoli (ad esempio, è spesso possibile noleggiare la strumentazione più idonea per il genere di misura programmata).

Di pari passo, lo sviluppo di tecniche di visione artificiale, dovuto anche all'evoluzione della robotica, ha avuto importanti ricadute sulla fotogrammetria digitale. In particolare, la fotogrammetria *Structure from Motion* (SfM) permette di ottenere modelli tridimensionali densi e precisi a partire da serie di immagini digitali acquisite in piena libertà, senza uso di complessi e costosi sistemi di orientamento delle camere. Anche se la base geometrica della nuova tecnica è la stessa della fotogrammetria tradizionale (equazioni di collinearità e geometria epipolare), vi è stato un avanzamento notevole, reso possibile anche dalla potenza di calcolo oggi disponibile, che consiste nell'utilizzo di algoritmi che individuano in modo automatico o semi-automatico i punti "omologhi" sulle immagini digitali acquisite da posizioni differenti intorno alla superficie di interesse. In tal modo, è possibile individuare l'orientazione delle camere nello spazio fisico e calcolare i parametri delle equazioni fotogrammetriche necessari a trasformare i pixel delle immagini in punti nello spazio tridimensionale. Si noti che, con l'avvento della fotografia digitale, la distanza focale e i parametri di orientazione interna di una fotocamera sono di norma inclusi nei metadata delle immagini da essa fornite in qualunque formato conosciuto (JPEG, TIFF, etc.). Infine, è da notare che, per definizione, un modello ottenuto mediante SfM è foto-realistico.

In questo lavoro sono messi a confronto i modelli ottenuti mediante TLS e SfM per valutare vantaggi e svantaggi di queste metodologie di rilievo nell'ottica di un monitoraggio veloce in caso di emergenza, ricollegandosi a lavori presentati precedentemente sia su questa collana, sia altrove, ad esempio Pesci et al. [2013] e Pesci et al. [2015]. In particolare, seguendo l'approccio basato sulla creazione di mappe morfologiche, verranno messi a confronto rilievi realizzati con alcune camere digitali, sia compatte che professionali, per evincerne l'affidabilità in termini di ripetibilità del risultato. È infine importante sottolineare come, in generale, nessuna tecnica di rilievo sia del tutto autosufficiente ai fini della completa descrizione dello stato deformativo di un edificio. Al contrario, la comprensione delle effettive prestazioni di un sistema di misura e l'uso di tecniche di supporto (ad esempio, stazione topografica totale nel rilievo fotogrammetrico nel caso in cui sia richiesto un modello georeferenziato) sono fondamentali per l'integrazione dei risultati nell'ambito di un progetto globale.

1. Tecniche utilizzate

1.1 Laser scanner terrestre

Il laser scanner terrestre (TLS) è attualmente ampiamente utilizzato nel rilievo architettonico, in particolare in quello finalizzato alla valutazione delle condizioni strutturali di un edificio, talvolta con il supporto della fotogrammetria digitale. Nel caso dell'Optech ILRIS 3D ER, che è uno strumento a tempo di volo (TOF), il diametro $D(r)$ dello spot in incidenza normale alla distanza di acquisizione r è $D(r)=1.7 \times 10^{-4} r+0.012$, il passo minimo di campionamento è $0.2 \times 10^{-4} r$ e la frequenza di scansione è 2,5 kHz [Optech, 2015]. La precisione nell'acquisizione del singolo punto è ~ 7 mm a 100 m, mentre la risoluzione spaziale corrispondente ad un passo di campionamento ottimale può raggiungere $ss(r)=0.2 \times 10^{-4} r$ [Pesci et al., 2011a].

Gli strumenti ad onda continua (CW) sono caratterizzati da migliori prestazioni in termini di precisione e velocità di acquisizione rispetto agli strumenti a tempo di volo (indicativamente ~ 5 mm a 50 m e 200-1000 kHz), da cui un loro sistematico uso nel rilievo architettonico. Poiché la portata massima di uno strumento CW è molto inferiore a quella di uno strumento TOF (100-120 m anziché 800-1000 m), l'osservazione di un edificio di grandi dimensioni potrebbe richiedere l'utilizzo di quest'ultimo. Recenti sperimentazioni hanno mostrato, tuttavia, che per lo studio e la comprensione delle piccole deformazioni il fattore più importante per un TLS è la stabilità di acquisizione cioè la ripetibilità delle misure che permette di superare i limiti di precisione e garantire un risultato realistico [Pesci et al., 2013].

In generale, uno strumento TLS fornisce una nuvola di punti in cui al dato geometrico è associata, quale dato radiometrico, l'intensità del segnale retroriflesso che dipende, oltre che dalla geometria dell'acquisizione, dalla riflettanza (s'intende alla lunghezza d'onda del segnale laser) del materiale dell'oggetto osservato. Al fine di ottenere un modello foto-realistico da dati TLS, si rende pertanto necessario l'uso di una fotocamera che possa fornire le immagini per attuare la *texture mapping* mediante appositi pacchetti *software*, ad esempio 3D Reshaper [Hexagon, 2015]. Alcuni strumenti sono dotati di una fotocamera integrata, pilotata mediante lo stesso sistema di pilotaggio dello strumento principale; in tal modo, grazie ad un apposito pacchetto *software* è possibile colorare direttamente la nuvola di punti, in modo completamente automatico. È il caso, ad esempio, del *software* RIEGL RiSCAN Pro utilizzato per il processamento di dati geometrici e fotografici forniti da strumenti dello stesso produttore [RIEGL, 2015].

1.2 Fotogrammetria SfM

La base della fotogrammetria SfM è la stessa della fotogrammetria stereoscopica tradizionale, ossia una struttura tridimensionale può essere ricostruita da una serie di immagini di un oggetto prese da un adeguato numero di punti di vista ben distribuiti spazialmente attorno all'oggetto stesso e con un'adeguata sovrapposizione (ogni singola area dell'oggetto da ricostruire deve essere ripresa da almeno due posizioni diverse e angolarmente spaziate rispetto ad essa). Ciononostante, SfM è una tecnica rivoluzionaria perché la geometria della scena, le posizioni e l'orientamento delle fotocamere e, nel caso in cui non siano già disponibili a priori, i parametri di calibrazione intrinseci della camera possono essere automaticamente e simultaneamente calcolati mediante algoritmi di calcolo avanzati. In particolare, l'algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [Lowe, 1999] individua in modo automatico i punti omologhi tra due immagini mediante: (i) riconoscimento in ciascuna immagine di particolari quali intersezioni tra linee, spigoli o altro; (ii) memorizzazione dell'intorno di ciascun particolare individuato; (iii) confronto tra gli intorni dei punti individuati nelle due immagini con una tecnica poco sensibile alla differenza di orientazione e di scala e individuazione dei punti probabilmente omologhi; (iv) esclusione delle false coppie di punti omologhi mediante la tecnica RANSAC (RANdom SAmple Consensus) [Fischler e Bolles, 1981], ossia alcune coppie di candidati punti omologhi sono scelte in modo casuale e utilizzate per individuare la corrispondente trasformazione geometrica tra le due immagini, mentre le coppie rimanenti sono utilizzate per testare tale trasformazione, ripetendo più volte la procedura fino ad ottenere un numero adeguato di coppie valide ("inliers"). L'individuazione automatica dei punti omologhi richiede che il rilievo dell'esterno di un edificio o di una superficie naturale sia eseguito molto rapidamente in modo da prevenire effetti dovuti al cambiamento dell'illuminazione da parte del Sole.

Il risultato del processamento di immagini mediante SfM è una nuvola di punti molto densa e foto-realistica, cioè con colore reale. È difficile fornire una valutazione dell'errore tipico perché una stima di esso non è prevista nel processo di ricostruzione della geometria. Tuttavia, James e Robson [2012] mostrano come una ragionevole stima di tale errore sia dell'ordine di ± 1 mm per ogni m di distanza di acquisizione.

La probabilità di successo dell'allineamento automatico delle immagini è molto elevata se le immagini sono prese correttamente, ossia nelle stesse condizioni di illuminazione e con le posizioni di osservazione

ben distribuite spazialmente, in particolare mai collineari. Nel caso in cui siano conosciute alcune posizioni assunte dalla fotocamera durante il rilievo, ad esempio perché essa è dotata di ricevitore GPS, esse possono essere utilizzate quali punti iniziali per le iterazioni, ottenendo così una sensibile riduzione del tempo di calcolo e un ulteriore aumento della già elevata probabilità di successo del processo di allineamento.

La tecnica SfM è attualmente utilizzata nel rilievo architettonico [Snavely et al., 2008] ed è stata recentemente introdotta anche nel rilievo geologico [Westoby et al., 2012] e geomorfologico [Ninfo et al., 2012].

Ulteriori informazioni sulla tecnica SfM, con particolare riferimento agli algoritmi utilizzati e ad eventuali problemi di convergenza degli stessi, possono essere desunte da qualsiasi testo dedicato alla visione artificiale, ad esempio Hartley e Zisserman [2004].

2. Caso di studio e rilievi

Il soggetto dei rilievi si inserisce in un contesto di tessuto urbano nella suggestiva piazza di Santo Stefano, a Bologna. Lo sfondo della piazza è la Basilica che le dà il nome: un intreccio di ben sette edifici di culto sorprendentemente incastonati l'uno nell'altro. Secondo la tradizione fu San Petronio, vescovo di Bologna, a ideare la basilica che doveva imitare il Santo Sepolcro di Gerusalemme e che fu costruita sopra un preesistente tempio dedicato a Iside. Gli edifici che compongono il complesso sono tutti molto antichi. Di questi edifici, si è scelto di osservare il prospetto della Chiesa del Crocefisso (Figura 1), comunemente ascritta all'VIII secolo con un'origine longobarda (736-744) ma ampiamente rimaneggiata nelle epoche successive (nell'XI sec. fu aggiunta la cripta dove furono traslate le reliquie dei santi Vitale e Agricola). La pianta è piuttosto semplice e in stile romanico: a navata unica con un presbiterio rialzato e cripta a 5 navate, con una semplice copertura a capriate. Sono noti i restauri avvenuti tra la fine dell'Ottocento (1895) e gli anni venti del Novecento, che hanno visto la riapertura delle finestre ad ogiva e del rosone ed interventi successivi che hanno riportato il pavimento e il portale all'attuale livello.



Figura 1. Area di studio e dettaglio del prospetto della Chiesa del Crocefisso.

Il rilievo di dettaglio della facciata è stato realizzato già nel 2011 nell'ambito di una tesi di laurea magistrale in Ingegneria Edile/Architettura presso l'Ateneo di Bologna per uno studio urbanistico mediante telerilevamento TLS alle diverse scale di indagine. In quel contesto, è stato utilizzato lo strumento Optech ILRIS 3D [Optech, 2015] ed è stato acquisito il prospetto di interesse da una distanza di circa 30 m con un passo di campionamento medio di 6-8 mm mediante una singola scansione, fornendo quindi una nuvola di punti le cui coordinate erano assegnate in uno stesso sistema di riferimento relativo (Figura 2). Il tempo

necessario alla misura è stato di circa 15/20 minuti, tempo tipico per una misura veloce da effettuare anche in situazione di emergenza. La verticalità dei dati è stata assicurata dall'uso di una base basculante in alluminio, concepita espressamente per lo strumento utilizzato, dotata di due bolle e montata su treppiede. In tal modo, è possibile ruotare lo strumento attorno all'asse orizzontale e a quello verticale fino a raggiungere la posizione più opportuna mediante semplici e controllati passi operativi e ottenendo una precisione adeguata per il tipo di applicazione, nell'ottica di eseguire rilievi rapidi, potenzialmente in condizioni di emergenza sismica. Per una normale livella a bolla è possibile stimare un errore di circa ± 0.3 mm/m che, convertito nella distanza di misura utilizzata nel caso del rilievo TLS in questione, porta ad un errore angolare di $\pm 0.017^\circ$, vale a dire una distanza in fuori asse (strapiombo alla massima altezza) di circa 4 mm per un prospetto come quello osservato la cui altezza è circa 15 m.

Il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito nel maggio 2015 utilizzando 3 diverse fotocamere digitali: una professionale ad alte prestazioni Nikon D200, una semiprofessionale Nikon D5000 ed una compatta Samsung ST60. I dettagli principali inerenti a tali apparecchi sono riassunti in tabella 1. Con ciascuna delle fotocamere a disposizione sono state acquisite immagini della chiesa da varie viste, con il semplice accorgimento di realizzare una sequenza fotografica tale da coprire il più possibile l'area di studio con immagini molto sovrapposte tra loro, in modo da consentire l'estrazione automatica dei punti omologhi necessari agli allineamenti e alle operazioni di generazione delle nuvole di punti dai modelli fotogrammetrici. Trattandosi di una facciata, lo schema di lavoro adottato per osservarla è basato sull'avanzamento secondo un semicerchio attorno a essa, in modo da rilevarne ogni parte con un'ottima copertura finale. In un rilievo fotogrammetrico, un parametro di riferimento di grande importanza è la *ground sampling distance* (GSD), ossia la distanza tra i centri di due pixel adiacenti misurata sull'oggetto osservato. Tale parametro esprime la risoluzione dell'immagine e quindi vincola la risoluzione ottenibile con il modello fotogrammetrico. La GSD dipende dalla distanza di acquisizione e, a parità di distanza, dalla particolare fotocamera utilizzata. Nella progettazione di un rilievo fotogrammetrico le posizioni dei punti di vista vanno stabilite sulla base della risoluzione richiesta e quindi della GSD che è necessario rispettare. Tuttavia, l'obiettivo del presente lavoro è verificare i risultati che è possibile ottenere in presenza di edifici danneggiati dal terremoto. In tal caso, i possibili punti di vista possono essere vincolati dalla presenza di macerie o di pareti pericolanti e quindi, per un dato strumento, potrebbe darsi che la GSD non sia ottimale. Le immagini complessivamente acquisite sono state 25 con la Nikon D200, 26 con la Nikon D5000 e 24 con la Samsung ST60, con una distanza media di acquisizione di 25 m e quindi GSD di 4 mm per la D200, 4 mm per la D5000 e infine 11 mm per la ST60. Poiché l'edificio è alto 15 m ed è osservato da 20-30 m di distanza, non si è fatto uso di aste, piattaforme o altri ausili per innalzare il punto di vista. Si sottolinea che la distanza utilizzata per gli scatti fotografici ha garantito, quasi per ogni immagine, di acquisire l'intera superficie di interesse.

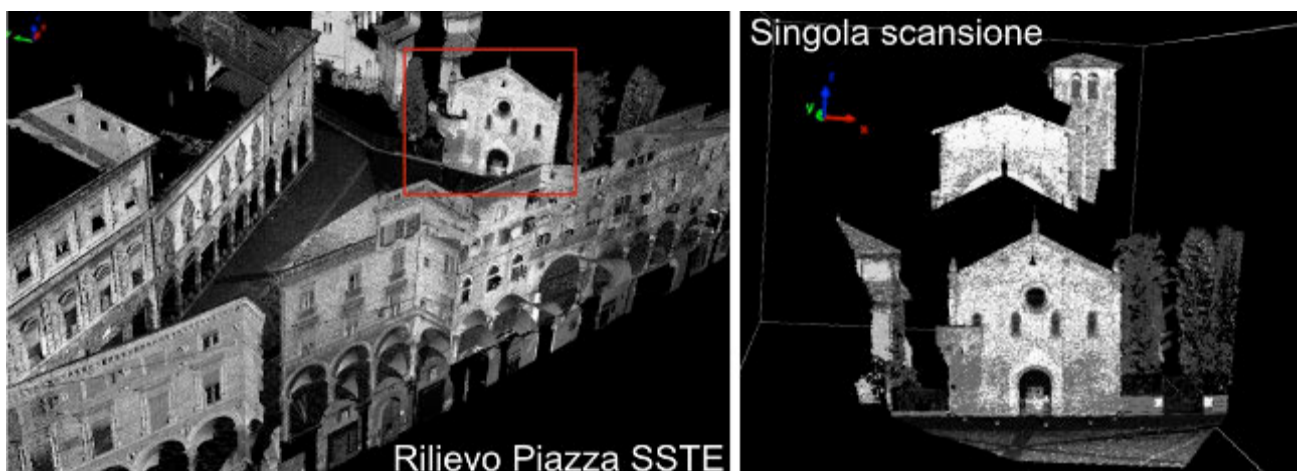


Figura 2. Nuvola di punti complessiva di piazza Santo Stefano in Bologna e singola scansione della Chiesa del Crocefisso e zone limitrofe comprese nel campo di vista, ottenute mediante laser scanner.

Modello	Unità di misura	Nikon D200	Nikon D5000	Samsung ST60
Sensore		CCD	CMOS	CCD
Matrice di pixel	px x px	3872 x 2592	4288 x 2848	4000 x 3000
	Mpx	10.1	12.2	12.0
Risoluzione orizzontale	dpi	300	300	480
Risoluzione verticale	dpi	300	300	480
Profondità	bit	24	24	24
Distanza focale	mm	35	32	5
Numero f		f/9	f/5.6	f/3.2
Esposizione	S	1/320	1/125	1/160
Sensibilità	ISO	200	220	80

Tabella 1. Caratteristiche principali delle fotocamere utilizzate. Numero f, tempo di esposizione e sensibilità si intendono riferiti alle specifiche condizioni di impiego (tutte le fotocamere sono dotate di teleobiettivo).

Il set di immagini acquisite con la camera Nikon D200 è mostrato nella figura 3, mentre in figura 4 è possibile vedere il risultato dell'allineamento automatico attuato mediante SfM, in cui sono riportate le posizioni spaziali via via assunte dalla predetta fotocamera durante il rilievo, nonché la posizione della facciata rilevata. Si noti come uno stesso particolare della facciata sia stato sempre acquisito in almeno 3-4 immagini della serie (il limite minimo teorico è 2) e come gran parte della facciata sia stata acquisita da ciascun punto di vista. Per le altre fotocamere si è proceduto in modo analogo.



Figura 3. Nel pannello superiore, il set di immagini catturate con la Nikon D200: gli scatti mostrano la semplicità delle operazioni per l'acquisizione della facciata. Nel pannello inferiore, la facciata acquisita frontalmente (in giorni differenti) con ciascuna delle tre fotocamere a disposizione.

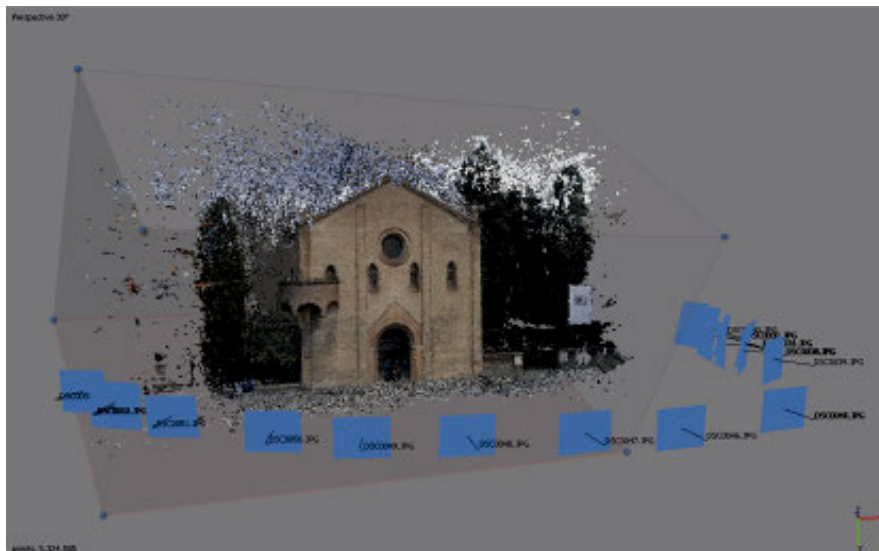


Figura 4. Posizione nello spazio e orientamento della fotocamera D200 durante il rilievo.

L'analisi dei dati, cioè dei set di immagini, è stata realizzata mediante il *software* per fotogrammetria SfM AgiSoft PhotoScan [AgiSoft, 2015], che permette di operare anche in modo totalmente libero senza necessità alcuna di inserire informazioni sulla posizione delle camere, sulla distanza tra esse, sull'orientamento esterno e sulle distorsioni delle lenti. Qualora dati sulla posizione o sulla calibrazione della camera siano noti, PhotoScan permette di tenerne conto. Photoscan opera secondo semplici passaggi, estremamente intuitivi: 1) importazione delle immagini e verifica della qualità, con l'esclusione di eventuali dati di scarsa qualità; 2) assegnazione, se presenti, delle posizioni di target di posizione nota; 3) allineamento automatico delle camere, inclusa valutazione di parametri di calibrazione; 4) verifica del risultato ed eventuale esclusione manuale di punti indesiderati, dovuti a rumore o ad erronea identificazione dei punti omologhi; 5) costruzione automatica di una nuvola di punti densa; 6) verifica del risultato e, se necessario, esclusione dei punti non validi; 7) eventuale generazione del modello digitale triangolato (*mesh*). In realtà, i passaggi obbligatori del *workflow*, finalizzati ad ottenere una nuvola di punti definita a meno di un fattore di scala, sono tre: 1), 3) e 5). Nelle specifiche sperimentazioni qui descritte sono stati attuati in PhotoScan solo tali 3 passaggi obbligatori, peraltro interamente automatizzati. La rimozione dei punti non validi o non interessanti e l'attribuzione di un fattore di scala sono state attuate a posteriori, utilizzando un diverso *software* specializzato per il trattamenti di nuvole di punti e modelli triangolati, ossia Innovmetric PolyWorks [Innovmetric, 2015], come descritto più sotto.

Il presente rapporto tecnico non è e non vuole essere un breve manuale di PhotoScan; tuttavia, è interessante sottolineare che, specialmente per quanto concerne il punto 3), è possibile ottenere l'allineamento mediante passaggi successivi indicati come *Low quality*, *Medium quality*, *High quality*. In sostanza, nella ricerca automatica di punti omologhi tra le immagini e loro estrazione per risolvere ai minimi quadrati le equazioni di collinearità e stimare tutte le variabili (parametri) necessarie alla ricostruzione in 3D dell'oggetto a partire dai fotogrammi a due dimensioni, è possibile "sottocampionare" le immagini per una resa in termini di rapidità di calcolo e di probabilità di convergenza. Si ottengono in tal modo delle posizioni approssimative della fotocamera che possono essere utilizzate come punti di partenza per il ricalcolo/riallineamento fine con l'uso dell'informazione completa. La ricostruzione della nuvola di punti può avvenire secondo varie scelte riguardo alla densità finale desiderata e quindi della precisione e della risoluzione richieste sulla base della specifica applicazione. Ad esempio, l'opzione *Ultra high quality* prevede l'utilizzazione integrale dell'informazione disponibile per la generazione della nuvola di punti, mentre le altre opzioni prevedono un grado di sottocampionamento progressivamente crescente. Le opzioni disponibili in PhotoScan sono *Ultra high*, *High*, *Medium*, *Low* e, infine, *Lowest quality*. Nella specifica applicazione è stata utilizzata l'opzione *High*.

È importante sottolineare che, qualora non si fornisca al programma alcuna informazione sulla geometria reale del sistema osservato, la nuvola di punti creata è caratterizzata da un'importante ambiguità: essa è definita a meno di un fattore di scala. Oltre ad essere definita in un sistema di riferimento relativo, la nuvola di punti non è assegnata in un sistema metrico. Anche se le geometrie siano esatte e le proporzioni degli elementi sono rispettate, è necessario calcolare a posteriori un fattore di scala.

Nella figura 5 sono mostrate le nuvole di punti estratte dai tre set di immagini digitali e la nuvola di punti ottenuta mediante TLS.

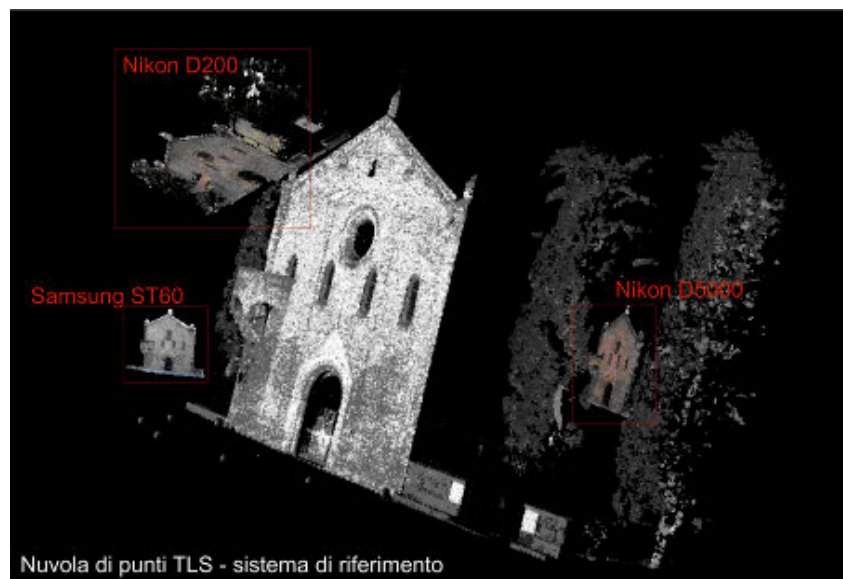


Figura 5. Nuvole di punti ottenute da TLS e fotogrammetria SfM per ciascuna delle fotocamere utilizzate.

Al fine di poter praticamente utilizzare i risultati ottenuti mediante SfM, e segnatamente di confrontare i risultati ottenuti con le varie fotocamere e le varie tecniche, è necessario attribuire un fattore di scala corretto alle nuvole di punti. Nel caso specifico, la disponibilità del dato TLS permette facilmente di assegnare una scala corretta.

In generale, per rappresentare una nuvola di punti SfM in un sistema metrico è necessario operare una trasformazione; una delle più utilizzate è quella di Helmert, cioè una rototraslazione con fattore di scala, basata sulla corrispondenza tra una serie di coppie di punti appartenenti ai due sistemi (quello della nuvola ottenuta mediante SfM e quello definitivo, in questo caso quello della nuvola di punti da TLS). Va tuttavia tenuto conto del fatto che i punti misurati con TLS possono descrivere un oggetto se presi nella loro totalità, ma non se singolarmente considerati. Infatti, sul posizionamento di ogni singolo punto entrano in gioco principalmente due fattori: il rumore sulla misura della distanza e il fatto che l'arrivo del segnale retroriflesso è associato al centro di uno spot ideale (l'area illuminata dal fascio laser) e quindi il punto fisico che ha dato luogo alla retroriflessione potrebbe non coincidere con esso. Al fine di introdurre il fattore di scala con una precisione soddisfacente e pertanto registrare la nuvola di punti o il modello nel sistema di riferimento desiderato non è quindi possibile far riferimento al numero minimo di coppie di punti, ossia 4, ma occorre considerare almeno 15-20 coppie di punti.

Un modo alternativo, che aiuta a velocizzare le operazioni, può essere il calcolo del rapporto tra lunghezze rappresentative nei due modelli in questione. In questo lavoro, per esempio, si è scelto di creare polilinee particolari, facili da identificare tramite i dettagli architettonici ben visibili sia sul modello TLS sia sulle nuvole fotogrammetriche e, dal rapporto tra le differenti lunghezze è stato semplice risalire al fattore di scala. Le linee di interesse sono state estratte più volte per avere una piccola statistica nella ripetibilità del risultato e definire il fattore di scala con maggiore certezza. Nello specifico sono stati determinati i tre fattori di scala che hanno consentito di riportare le misure SfM su immagini Nikon D200, Nikon D5000 e Samsung DT60 nello stesso sistema metrico del TLS.

In Figura 6 sono mostrate la polilinea ottenuta mediante dati TLS e quella corrispondente sulla nuvola di punti da SfM (caso della fotocamera D200). Confrontando e rapportando le misure delle lunghezze estratte dal TLS (26.984 m) e da SfM (7.960 in unità arbitrarie, non metriche) è possibile risalire al fattore di scala con notevole precisione, essendo l'incertezza sui valori estratti (qualche cm) divisa per la lunghezza della polilinea. Si tratta cioè di lavorare con piccoli errori relativi.

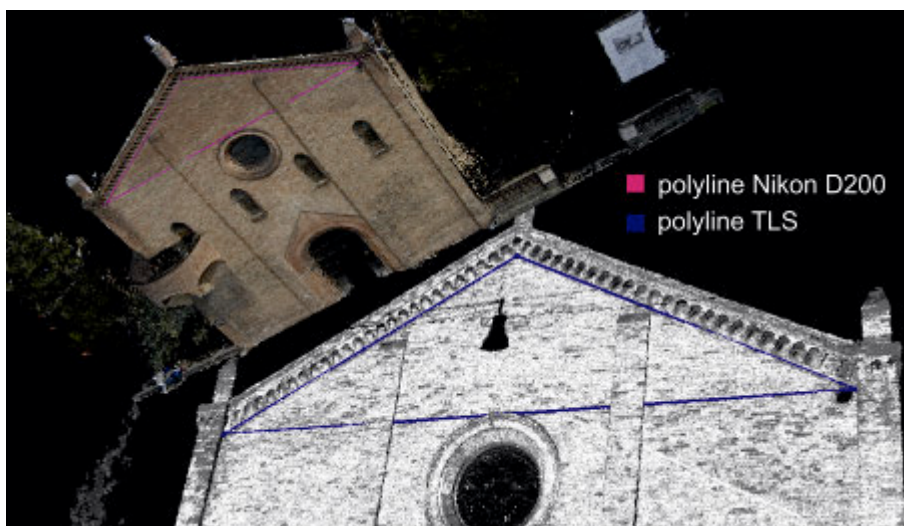


Figura 6. Estrazione di lunghezze con polilinee ottenute cliccando sui particolari riconosciuti nelle nuvole di punti.

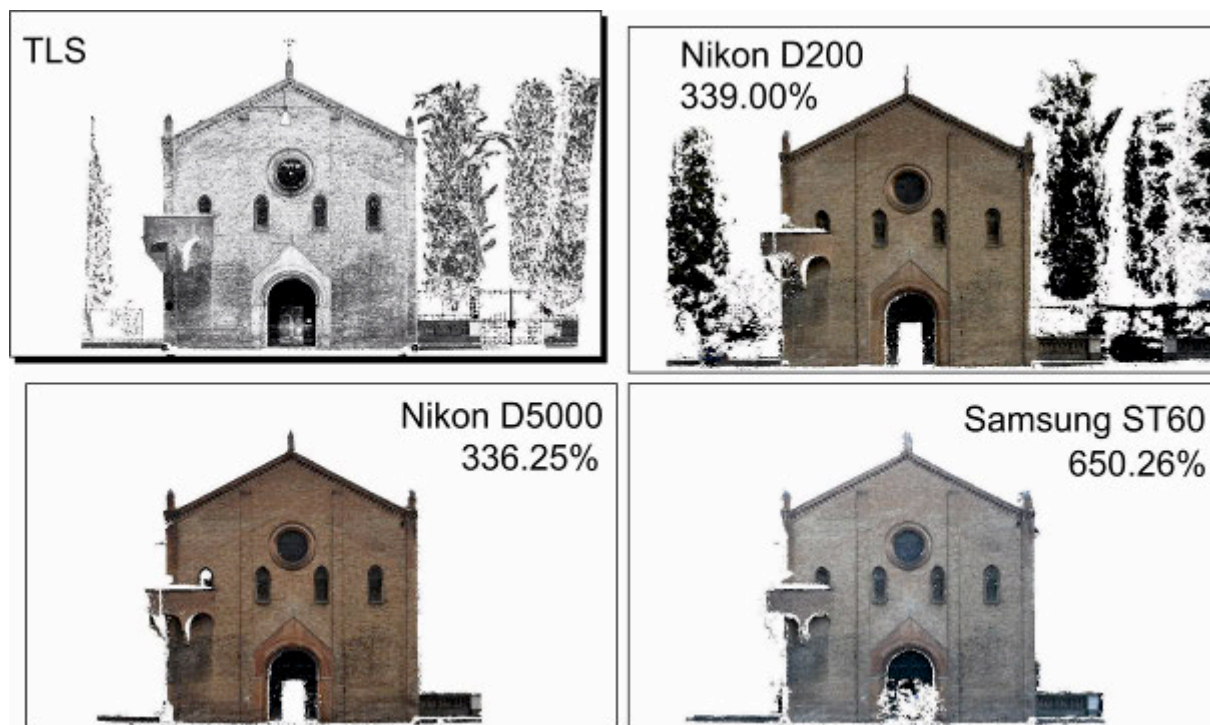


Figura 7. Tutte le nuvole di punti registrate nello stesso sistema di riferimento. Si riportano anche i fattori di scala dati in percentuale ai fini della trasformazione dei sistemi di riferimento SfM.

La figura 7 mostra tutte le nuvole di punti correttamente scalate e riferite allo stesso sistema di riferimento. Si noti come i colori siano nettamente differenti: il TLS mostra il dato di intensità del segnale laser (nello specifico, 1535 nm, nel vicino infrarosso) in toni di grigio, mentre le nuvole di punti da SfM mostrano una tonalità e qualità di colore (dato RGB) dipendente dalla camera utilizzata. In ogni caso, le nuvole di punti da SfM sono foto-realistiche, fatto di non trascurabile importanza nelle applicazioni architettoniche.

Nel caso descritto si è fatto uso di dati TLS, essendo essi disponibili. In generale, ciò non avviene e, ovviamente, l'uso di un siffatto strumento come mera tecnica di supporto non è consigliato. In tal caso si può ricorrere, ad esempio, ad una stazione topografica totale, del costo minore di un ordine di grandezza rispetto

ad un tipico strumento TLS, con la quale individuare particolari sulla superficie e quindi definire le coppie di punti o le polilinee, a seconda del metodo utilizzato, per poter giungere all'attribuzione del fattore di scala e, contestualmente, alla registrazione nel sistema di riferimento desiderato. Nel caso in cui sia possibile accedere direttamente alla parete indagata, la misura dei lati delle polilinee può eseguirsi con flessometro o altri strumenti di misura dal costo trascurabile. Ciò è un vantaggio non indifferente del metodo delle polilinee, che non richiede l'identificazione della posizione di punti, anche se esso non risolve automaticamente la questione della georeferenziazione (o comunque della registrazione in un sistema di riferimento definito) della nuvola di punti SfM che dovrà eseguirsi in altro modo.

3. Risultati

I dati forniti da TLS e dalle procedure SfM di elaborazione di immagini digitali sono nuvole di punti, cioè insiemi densi di punti in cui, oltre ai dati geometrici (coordinate), sono assegnati valori radiometrici di intensità o di colore RGB. Per tale motivo, i dati sono qui trattati con l'ausilio del *software* PolyWorks, particolarmente efficiente nell'allineamento e nel confronto delle nuvole di punti nonché nell'ispezione dei modelli digitali.

Lo scopo principale dello studio è verificare il contenuto di informazione che è possibile estrarre da una nuvola di punti ottenuta mediante SfM mettendola a confronto con l'ormai noto contenuto geometrico della nuvola di punti TLS. Si utilizza pertanto una procedura standard utilizzata nelle analisi di dati TLS articolata nei seguenti passaggi fondamentali [Pesci et al., 2013]: 1) importazione delle nuvole di punti, già scalate e generate, per ciascuna di esse, di un modello 2.5D riferito ad una griglia regolare con maglia compatibile con il passo di campionamento; 2) scelta di un set di coppie di punti omologhi sui modelli TLS e SfM per eseguire un allineamento preliminare dei sistemi di riferimento; 3) allineamento fine dei modelli, basato sull'algoritmo surface-to-surface ICP (Iterative Closest Point) implementato nel modulo IMInspect di PolyWorks e salvataggio della matrice di roto-traslazione così ottenuta; 4) registrazione della nuvola di punti SfM nel sistema di quella TLS mediante uso della matrice di roto-traslazione ottenuta nel punto precedente; 5) analisi delle nuvole di punti con lo strumento per l'ispezione ed estrazione delle primitive di riferimento quali descrittori del prospetto di interesse; 6) creazione delle mappe morfologiche per studiare le caratteristiche dell'edificio e, in particolare, individuare differenze rispetto al comportamento atteso (ad esempio, incurvamenti di superfici che dovrebbero essere piane) che potrebbero essere legate a carichi statici e/o dinamici anomali che hanno agito o agiscono sulla struttura.

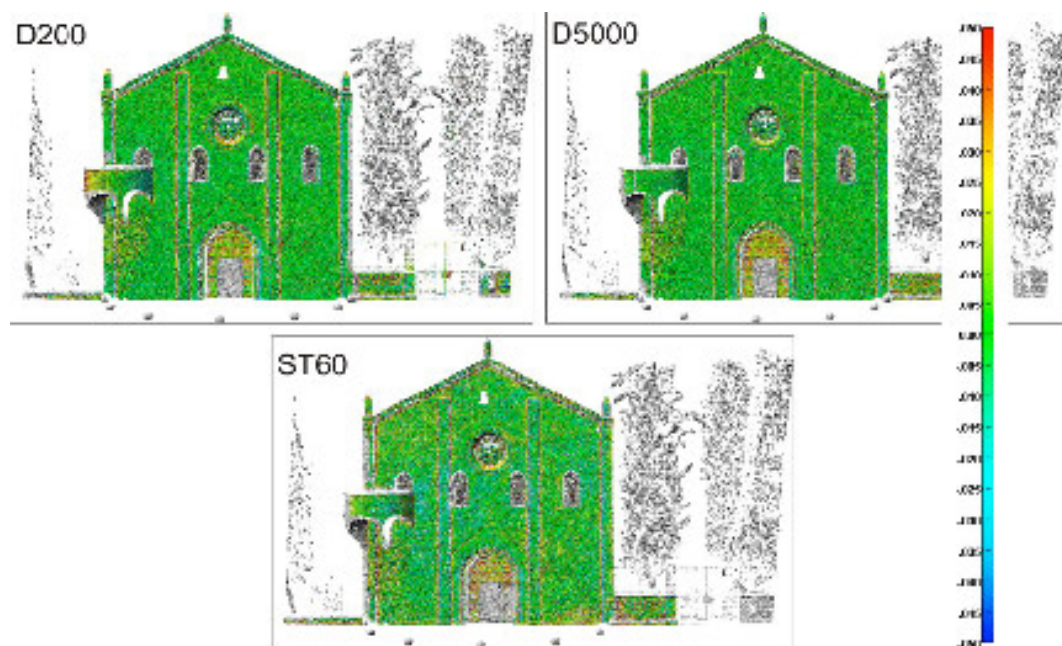


Figura 8. Mappa differenze tra i modelli SfM e il modello TLS, considerato come riferimento, nell'intervallo tra -0.05 m e 0.05 m.

L'applicazione di questa procedura alle tre nuvole di punti ottenute da SfM ha permesso di allineare tutti i modelli in un unico sistema di riferimento. In tal modo, è stato possibile attuare una prima analisi, ossia un confronto diretto tra i modelli secondo la direzione normale agli elementi di superficie del modello TLS, usato come riferimento (Figura 8). I risultati mostrano un buon accordo generale e mettono in evidenza che nel solo caso relativo alla camera compatta (Samsung DT60) le differenze sembrano talvolta distribuite secondo delle chiazze, a suggerire la presenza di un pattern e comunque di una distribuzione non casuale.

È immediato osservare delle differenze che certamente corrispondono a dati oggettivi, come per esempio i valori elevati sul portone di legno che, certamente, tra il 2010 ed il 2015 è stato aperto e chiuso più volte per cui difficilmente può avere mantenuto la stessa posizione rispetto alle murature. Altrettanto facilmente si individuano delle differenze nelle zone di spigolo, in particolare nel passaggio muro-lesena, dove la tecnica SfM speditiva utilizzata tende a fornire un risultato "smussato". Ciononostante la statistica sulle differenze estratte (sotto campionate per facilità di calcolo) mostrano distribuzioni tipicamente gaussiane sia nei confronti tra le nuvole di punti SfM e il riferimento (la nuvola di punti TLS), sia nei confronti delle nuvole di punti SfM tra loro (Figura 9).

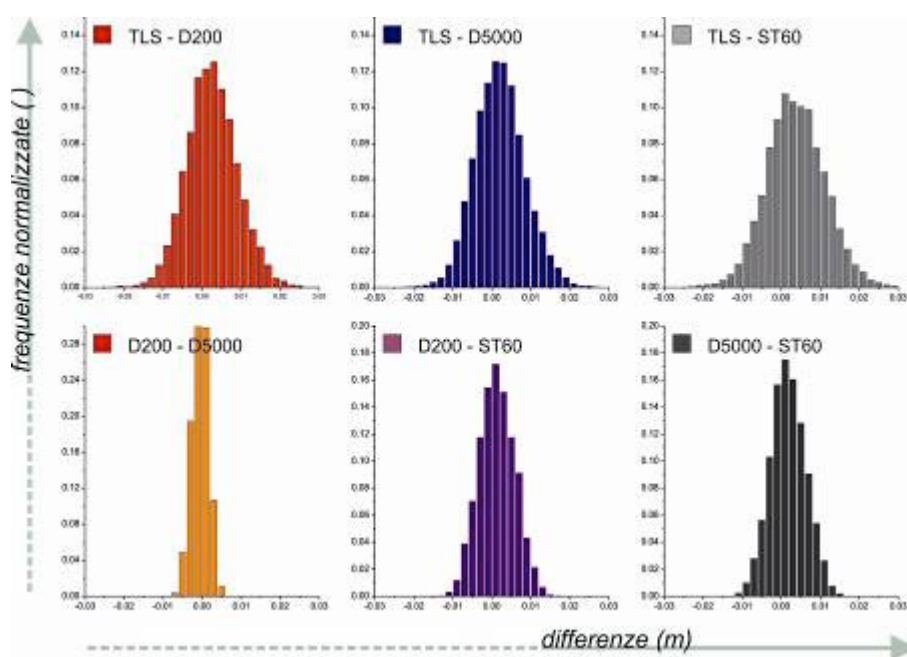


Figura 9. Distribuzione delle differenze tra le nuvole di punti.

La seconda analisi, attuata direttamente sulle nuvole di punti e non sui modelli, è consistita nell'estrazione delle informazioni sulle morfologie dei prospetti. Per fare ciò, per ciascuna nuvola di punti (SfM o TLS) è stato utilizzato il metodo dei piani di riferimento adattati, mediante approccio ai minimi quadrati, ai punti che giacciono sul prospetto. Ovviamente sono stati esclusi tutti i punti sulle zone non aderenti al muro come finestre, pulpiti, decorazioni del portale, rosone, tegole, lesene, e così via, che potrebbero dare falsi positivi o mascherare risultati rilevanti. In tal modo, il piano si può considerare rappresentativo della parete muraria. Il calcolo diretto delle differenze punto-piano permette di ottenere la morfologia, intendendo come tale la distanza di ogni elemento della nuvola di punti dalla primitiva di riferimento che è la rappresentazione teorica del muro stesso. I risultati ottenuti su tutte le nuvole di punti ed il piano fittato con i dati TLS (si ricorda per chiarezza che tali nuvole di punti sono tutte allineate nello stesso sistema di riferimento), sono mostrati nella figura 10.

È possibile osservare come le nuvole di punti ottenute dalle due fotocamere migliori (Nikon D200, professionale, e D5000, semiprofessionale) possano fornire informazione spazialmente molto densa e precisa sulle fattezze del prospetto e, benché mostrino più particolari, siano in completo accordo con il risultato da TLS. Si evidenzia ancora l'errore di "arrotondamento" nelle zone spigolose (lesene). Il risultato ottenuto con i dati forniti dalla fotocamera più economica, cioè la ST60, benché meno preciso, è comunque adeguato per caratterizzare il prospetto.

Uno sguardo di dettaglio del crocefisso sopra il portale della chiesa mostra come la qualità del modello ottenuto utilizzando le immagini acquisite mediante la ST60 sia nettamente inferiore a quanto è possibile ottenere con gli altri apparecchi (Figura 11). Tale minor dettaglio influisce probabilmente sulla precisione dell'allineamento delle immagini e certamente su precisione e risoluzione della ricostruzione fotogrammetrica delle nuvole di punti.

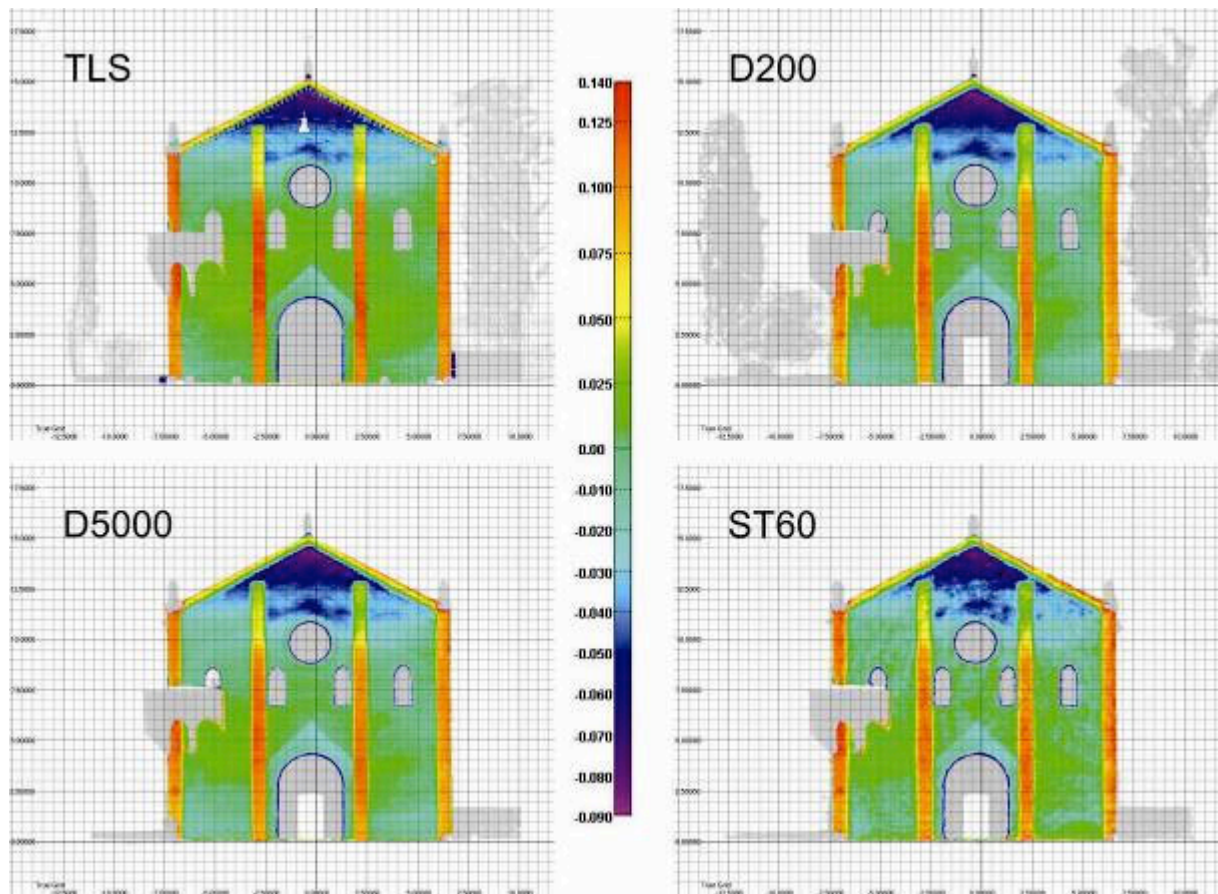


Figura 10. Morfologie estratte dalle nuvole di punti nell'intervallo da -0.09 a +0.14 m.



Figura 11. Particolare della facciata della chiesa in immagini acquisite con le tre fotocamere utilizzate per la fotogrammetria SfM.

4. Note e Conclusioni

Le esperienze descritte in questo lavoro si collocano nello studio di strategie di rilievo di tipo speditivo concepite per essere utilizzate anche nelle situazioni di emergenza sismica. Le osservazioni ottenute con

strumentazioni di tipo TLS sono già state testate e validate per essere operative e fornire dati utili, ripetibili e realistici sul possibile stato deformativo di un edificio interessato da terremoto e, soprattutto, con opportuni test ed esperimenti è possibile definire dei valori di soglia per l'accettabilità o lo scarto dei risultati [Pesci et al., 2013]. Le nuvole di punti TLS analizzate, benché caratterizzate da un certo livello di rumore nell'acquisizione del singolo punto (indicativamente 7 mm per una distanza di acquisizione di 100 m per un tipico strumento *long range*), possono essere utilizzate per osservare variazioni di alcuni millimetri sia nel confronto diretto tra modelli multi-temporali, sia nelle analisi morfologiche dei prospetti rilevati in modo indipendente.

La fotogrammetria digitale SfM permette di estrarre dense nuvole di punti, atte a rappresentare gli oggetti osservati, in tempi relativamente brevi sia in termini di acquisizione dei fotogrammi (che deve comunque essere rapida in modo da prevenire variazioni delle condizioni di illuminazione e ombra che potrebbero impedire la convergenza dei calcoli per l'allineamento delle immagini), sia in termini di *processing* dei dati, peraltro fortemente automatizzato. È quindi tecnica particolarmente adatta al rilievo speditivo. In sostanza, è possibile trattare i dati SfM con le stesse tecniche di elaborazione concepite per i dati TLS, in sostanza senza distinguere tra le possibili fonti delle nuvole di punti (rilievo laser o rilievo fotografico).

È interessante focalizzare l'attenzione sul fatto che un rilievo SfM permette di operare senza alcun vincolo in termini di orientamento interno ed esterno delle camere; in particolare, è possibile ottenere in modo altamente automatizzato delle nuvole di punti dense e precise, che permettono una buona descrizione geometrica dei prospetti, nonché foto-realistiche perché il dato radiometrico è il colore RGB. Ciò anche nel caso in cui non si abbia alcuna conoscenza delle caratteristiche ottiche e tecniche della fotocamera utilizzata, purché si disponga di uno strumento di qualità, dotato di una buona risoluzione effettiva, intesa come quantità di pixel significativi per la descrizione nelle immagini dei particolari acquisiti sui prospetti. Come accennato nella sezione dedicata alla descrizione delle tecniche utilizzate, qualora qualche parametro intrinseco della fotocamera dovesse cambiare per effetto del cambiamento dell'ottica o della focalizzazione, o anche della sostituzione dell'intera fotocamera, i *metadata* inclusi nelle immagini permettono comunque di procedere. In taluni casi potrebbe comunque essere opportuno processate separatamente le immagini relative a zone acquisite con parametri molto diversi (ad esempio, con o senza teleobiettivo) e procedere poi all'allineamento delle nuvole di punti parziali a dare la nuvola di punti complessiva.

I risultati evidenziano come i modelli SfM ottenuti da tre fotocamere, di cui una professionale (Nikon D200), una semi-professionale (Nikon D5000) ed una compatta (Samsung ST60), siano confrontabili con i dati telerilevati mediante TLS. Dai confronti emerge un ottimo accordo tra i risultati TLS e SfM sia in termini di differenze dirette che nella restituzione di accurate mappe morfologiche. L'unica eccezione negativa si è osservata nel caso della camera compatta che, probabilmente per una definizione e risoluzione non ottimale delle immagini dà luogo alla creazione di alcuni pattern in realtà inesistenti nella parte interna della nuvola di punti (Figura 11).

Un punto critico del rilievo SfM consiste nella necessità di fornire un fattore di scala alle nuvole di punti per poterle inserire in un sistema metrico e quindi restituire un modello registrato in un conveniente sistema di riferimento. La scelta di estrarre la lunghezza di polilinee create congiungendo particolari ben visibili nelle nuvole di punti fotogrammetriche e TLS (fino ad avere una lunghezza dello stesso ordine di grandezza del perimetro dell'area osservata) si è rilevata ottimale per calcolare il fattore di scala tra i sistemi di riferimento. Il motivo risiede nel fatto che, confrontando lunghezze relativamente importanti (alcuni metri), gli errori che si commetterebbero nella scelta delle coppie di punti per le trasformazioni di Helmert (rototraslazioni più fattore di scala) vengono estremamente ridimensionati. Inoltre, l'uso delle polilinee è compatibile con l'impiego di economicissimi flessometri, mentre l'attribuzione di un fattore di scala basato sulle coppie di punti omologhi richiederebbe quantomeno un rilievo di supporto con stazione topografica totale per misurare le posizioni di un adeguato numero di punti.

La natura dei dati utilizzati, nonostante si tratti in tutti i casi nuvole di punti, quindi analoghi dal punto di vista delle operazioni tipiche di post processing, è significativamente diversa. Nel caso del TLS, che è uno strumento attivo, ciascun punto acquisito corrisponde ad un calcolo diretto della posizione dell'elemento che ha dato luogo alla riflessione dell'impulso laser a partire dalla misura del tempo di volo dell'impulso stesso e alla sua direzione di emissione (e quindi di ricezione). Nel caso della tecnica SfM si eseguono invece osservazioni completamente passive e si procede alla ricostruzione della geometria del sistema osservato a partire dalle immagini fotografiche attraverso il calcolo dei parametri di orientazione e di calibrazione delle fotocamere e soluzione delle equazioni di collinearità, associando quindi ai pixel definiti in spazi 2D i punti corrispondenti in uno spazio 3D. Nelle zone in cui sono presenti forti discontinuità geometriche, come per

esempio gli spigoli delle lesene o delle finestre, si possono creare delle leggere distorsioni, ad esempio le forme cercate risultano essere lievemente arrotondate perché, per una certa distanza di acquisizione e per un numero contenuto di immagini, la risoluzione dell'apparecchio non consente di valutare con grande precisione la posizione del punto. Non a caso, i lamentati effetti di "arrotondamento" sono nettamente minori nel caso di una fotocamera professionale o semiprofessionale rispetto a quello di una fotocamera compatta.

Nel caso in cui si riduca sensibilmente la distanza di acquisizione è possibile migliorare la qualità del modello della superficie osservata grazie al notevole incremento del contenuto informativo, in termini di pixel nell'unità di area acquisita con ciascuna posa (Figura 12). Tale figura evidenzia una peculiarità che distingue fortemente il rilievo fotogrammetrico. Infatti, uno strumento TLS è caratterizzato da un rumore specifico che dipende dalle dimensioni dello spot (dipendenti a loro volta dalle condizioni e dalla distanza di acquisizione r , con dipendenza del tipo $a+br$), dal rumore del sottosistema che individua la direzione di invio dell'impulso (rumore dipendente dalla distanza, con dipendenza del tipo $c+dr$) e dal rumore del sottosistema di misura del tempo di volo (indipendente dalla distanza per un tipico rilievo architettonico). Come mostrato in Pesci et al. [2011], ciò comporta che è possibile osservare dettagli caratterizzati da una data dimensione caratteristica solo con un giusto compromesso tra passo di campionamento e distanza di osservazione, che si traduce in densità di acquisizione e dimensione dello spot sulla superficie rilevata. Inoltre, vi è un limite di risoluzione ottenibile che non migliora con la distanza; un miglioramento potrebbe ottenersi solo utilizzando uno strumento TLS a triangolazione, caratterizzato da un'ottima risoluzione a breve/brevissima distanza di acquisizione (qualche metro), ma insoddisfacente già a media distanza (nell'ordine della decina di metri), da cui la necessità di utilizzare due strumenti diversi e di elevato costo, fatto generalmente improponibile. Nel caso della fotogrammetria, invece, a patto che le condizioni di illuminazione siano buone, avvicinandosi all'oggetto di interesse è possibile migliorare la GSD attesa. Nel caso specifico di figura 12, è possibile vedere come sia addirittura possibile osservare la profondità delle scalpellature in un *range* di circa 1 mm a partire da immagini ottenute dalla distanza di 1 m (quindi ciascun pixel sulla parete acquisita ha lato pari a 0.18 mm nel caso della fotocamera Nikon D200 e 0.4 mm nel caso della Samsung ST60). Una tale risoluzione in profondità non è accessibile con uno strumento TLS progettato per rilievi a media-lunga distanza ma richiederebbe uno strumento a triangolazione.

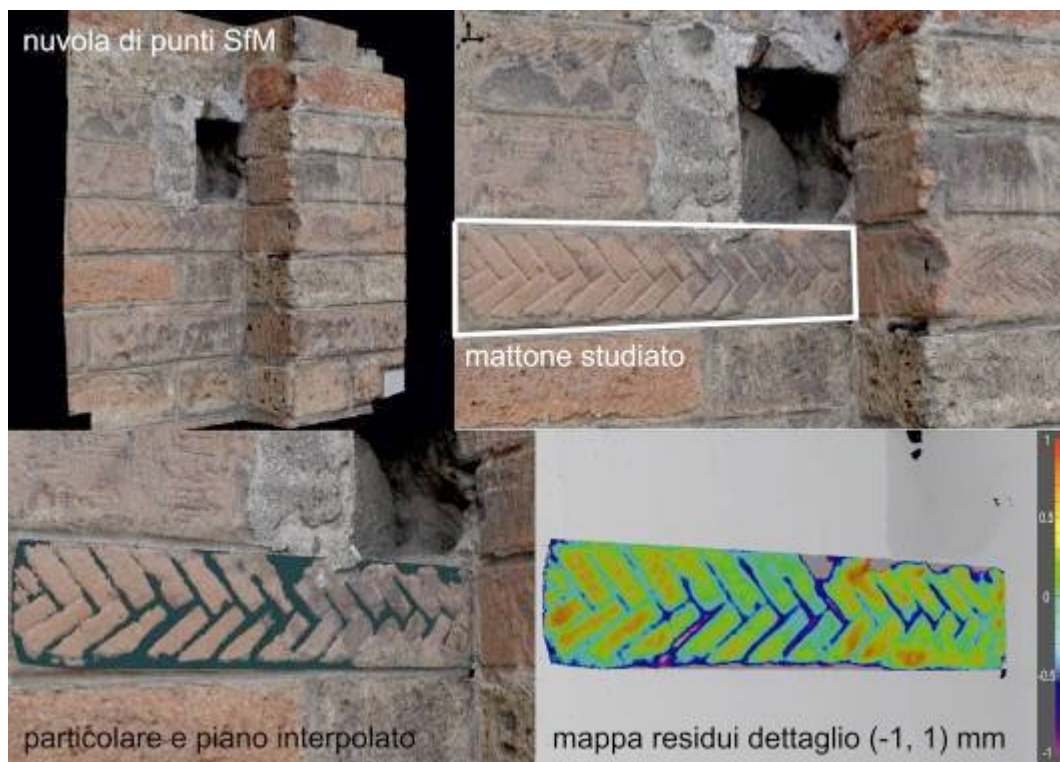


Figura 12. Dettaglio 3D modellato mediante SfM a partire da immagini scattate da breve distanza. Si nota come sia possibile osservare addirittura la profondità delle scalpellature in un range di circa 1 mm, prestazione non ottenibile con uno strumento TLS per il rilievo architettonico.

Come accennato nella sezione dedicata ai risultati, un'osservazione ripetuta di un prospetto (o di altra superficie) finalizzata a produrre nuvole di punti multitemporali mediante SfM non richiede necessariamente l'esecuzione di misure complicate e onerose con bersagli e stazione topografica totale. In particolare, nel caso in cui la parete indagata sia accessibile, è possibile fissare il fattore di scala individuando una polilinea anche mediante metodi di misura a costo pressoché nullo. Se l'obiettivo è valutare l'evoluzione nel tempo dello stato deformativo di una parete con misure ripetute e speditive (ad esempio in condizioni di emergenza sismica), e non è strettamente richiesta la georeferenziazione immediata dei modelli, in linea di principio è sufficiente individuare una scala in modo relativamente approssimato (con errore cioè fino al 10% circa) e riscalarne ogni nuvola di punti su quella di riferimento iniziale, onde operare nello stesso sistema di riferimento metrico o quasi-metrico. In casi come questi, il metodo della polilinea è applicato alla nuvola di riferimento in modo relativamente approssimato, ad esempio perché sono accessibili solo aree della superficie indagata distribuite in modo geometricamente non ottimale (a causa, ad esempio, dell'accessibilità della sola parte bassa di un edificio di rilevante altezza o della presenza di macerie o, ancora, di condizioni di inaccettabile pericolo nel corso di un'emergenza sismica). La scala della nuvola di punti di riferimento viene poi attribuita alle altre nuvole multitemporali mediante polilinee rappresentative ben distribuite, modellate in ambiente di analisi di nuvole di punti, dunque con un approccio analogo a quello qui considerato, dove i dati di riferimento erano ottenuti mediante TLS. In tal modo, è possibile far sì che l'errore di scala rispetto ad un riferimento metricamente corretto sia lo stesso per tutte le nuvole e sia trascurabile nel confronto tra ogni coppia di esse. Se l'errore relativo di scala è σ_S/S , dove S è la scala e σ_S la corrispondente incertezza, nel caso in cui il piano di riferimento di una parete sia xz , e dunque le differenze tra nuvola e piano ottenute mediante analisi morfologica siano lungo l'asse y , dunque Δy , l'errore relativo a tale Δy è esso stesso di σ_S/S . Se l'errore relativo del fattore di scala è del 10%, l'errore sulle mappe morfologiche è esso stesso di circa il 10%. Quando sarà possibile fissare un fattore di scala migliore (ad esempio successivamente alla cessazione dell'emergenza sismica) sarà poi possibile correggere i risultati ottenuti con un fattore unico per tutte le nuvole di punti utilizzate e perfezionare il risultato che, comunque, non sarà molto distante da quello approssimato. Ulteriori test in tal senso, finalizzati alla redazione di un protocollo di impiego della fotogrammetria SfM in condizioni di emergenza sismica, sono pianificati nel quadro delle attività degli autori del presente rapporto tecnico.

La questione della georeferenziazione, e quindi dell'attribuzione di una verticalità accurata, è strettamente legata a quella del fattore di scala. Il presente rapporto tecnico tratta del rilievo SfM finalizzato alla generazione di nuvole di punti da utilizzare per lo studio dell'evoluzione della deformazione di edifici in condizioni di emergenza sismica. Questo significa che una verticalità accurata, pur importante, può essere assegnata alla fine dell'emergenza sismica, limitandosi ad una verticalità approssimativa delle nuvole di punti multitemporali generate mediante osservazioni speditive, in analogia al fattore di scala approssimato a cui si è alluso nel capoverso precedente. È importante sottolineare che ciò non vale invece per il rilievo architettonico di precisione eseguito, ad esempio, per finalità documentali; in tal caso, la verticalità deve essere subito garantita, da cui la necessità dell'uso di apposite tecniche ancillari (ad esempio, stazione topografica totale), e potrebbe anche essere consigliabile l'uso di tecniche di telerilevamento diverse dalla fotogrammetria SfM.

L'uso della fotogrammetria SfM non porta solo vantaggi, ma ha anche qualche limitazione insita nel fatto che è basata esclusivamente su sensori passivi e quindi le misure possono eseguirsi solo in condizioni di illuminazione soddisfacenti. Allo scopo va sottolineato come l'uso del *flash* possa dar luogo a riflessi o altre forme apparenti sulle immagini, sì da impedire la convergenza dell'algoritmo di allineamento automatico delle immagini.

In conclusione, i test hanno mostrato come la fotogrammetria SfM sia adatta a caratterizzare in modo dettagliato la geometria di una facciata e di evidenziarne le deviazioni rispetto al comportamento atteso, attraverso misure estremamente speditive, spesso della durata complessiva di qualche decina di minuti comprendendo anche i rilievi di dettaglio a breve distanza, eseguiti con la stessa fotocamera. Tale tecnica, che permette di eseguire rilievi a basso costo pur producendo nuvole di punti dense e precise, di qualità non diversa, dal punto di vista geometrico, da quella ottenibile mediante costosi rilievi con TLS ma caratterizzate da *texture* foto-realistica, è dunque particolarmente adatta all'esecuzione di rilievi speditivi in condizioni di emergenza sismica.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Teresa Caputo per i preziosi suggerimenti e le attente valutazioni fornite nella fase di revisione.

Bibliografia

- Agisoft, (2015). Descrizione del pacchetto software PhotoScan. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.agisoft.com/> (ultimo accesso: 28.05.2015).
- Fischler M.A., Bolles R.C., (1981). *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. Communications of ACM, 24(6), 381–395.
- Hartley H., Zisserman A., (2004). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, New York, 655 pp.
- Hexagon, (2015). Descrizione del pacchetto software Reshape 3D. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.3dreshaper.com/> (ultimo accesso: 20.07.2015).
- Innovmetric, (2015). Descrizione del pacchetto software PolyWorks. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.innovmetric.com> (ultimo accesso: 12.05. 2015).
- James M.R., Robson S., (2012). *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application*. Journal of Geophysical Research 117 (F03017), doi: 10.1029/2011JF002289
- Lowe D.G., (1999). *Object recognition from local scale-invariant features*, Proceedings of the International Conference on Computer Vision, vol. 2, pp. 1150–1157.
- Ninfo A., Zizioli D., Meisina C., Castaldini D., Zucca F., Luzi L., De Amicis M., (2012). *The survey and mapping of sand-boil landforms related to the Emilia 2012 earthquakes: Preliminary results*. Annals of Geophysics 55(4), 727–733.
- Optech, (2015). Descrizione e brochure del laser scanner ILRIS 3D. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.optech.com/index.php/product/optech-ilris/> (ultimo accesso: 20.03.2015).
- Pesci A., Bonelli F., Teza G., Perikleous A.L., (2015). *L'analisi morfologica di dati TLS per individuare variazioni ed irregolarità in relazione allo stato deformativo di un monumento: valutazione del metodo e applicazioni*. Rapporto Tecnico INGV 305, 1–27.
- Pesci A., Teza G., Bonali E., Casula G., Boschi E., (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, 185–198.
- Pesci A., Teza G., Bonali E., (2011a). *Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization*. Remote Sensing 3(1), 167–184.
- Pesci A., Bonforte A., Casula G., Puglisi G., Aiesi G., Amantia A., Calvagna F., Cantarero M., Consoli S., Consoli O., Manni M., Marturano M., Saraceno B., (2011b). *Esperienza di monitoraggio mediante laser scanner nell'isola di Vulcano: rilievo multi temporale della Forgia Vecchia*. Rapporto Tecnico INGV 184, 1–15.
- RIEGL, (2015). Descrizione del pacchetto software RiSCAN Pro. Disponibile online all'indirizzo: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/Infosheet-RiSCANPRO_2014-10-07.pdf (ultimo accesso: 20.07.2015).
- Snavely N., Seitz S.N., Szeliski R., (2008). *Modeling the world from internet photo collections*. International Journal of Computer Vision 80(2), 189–210.
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., (2012). *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. Geomorphology 179 (2012) 300–314.

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia